

Utveckling av ett två-axligt balanserat bildsensorstabiliseringsystem

Nicklas Lindell & Albert Knutsson

Den här artikeln beskriver design av ett mekaniskt balanserat system med aktuatorer för bildsensorstabilisering i en handhållen kamera. Framtagningen av olika linjära dc aktuatorkoncept görs med hjälp av simuleringsprogramvarorna FEMM och Comsol. Vidare visas prototyputveckling och testresultat för validering av simulerade resultat.

1 Introduktion

Ingen människa är kapabel att hålla sina händer helt stilla när de försöker ta foto med en handhållen kamera. Alla gör små rörelser i frekvenser mellan 0-100Hz vare sig de vill eller inte. Dessa rörelser är mycket små, men kan leda till oskarpa bilder. Det finns tre olika metoder för att kompensera för användarörelserna och på så sätt förbättra skärpan på bilden, förflyttning av linsen, förflyttning av bildsensorn samt mjukvarubaserad kompensering. Detta projekt behandlar stabilisering genom förflyttningen av bildsensorn. Små aktuatorer flyttar bildsensorn i motsatt riktning till användarskakningen så att bildsensorn är stationär i förhållande till objektet som ska fotograferas. Ett sådant systemt kräver energi och avger förluster i form av värme. Energi är en begränsad tillgång i en handhållen batteridriven kamera och därför ska aktuatorerna optimeras för att kräva så lite energi som möjligt. Genom att inkorporera en motvikt som är direkt kopplad till bildsensorn kan inverkan från gravitationskraften tas bort. Detta avlastar aktuatorsystemet som nu inte längre behöver konstant kämpa för att motverka den eviga gravitationskraftens inverkan på bildsensorn. Även designutrymmet är begränsat i en kamera redan fylld av komponenter där storlek och vikt är tunga försäljningsargument. För att kunna implemetera detta systemet behövs fem delar.

1. Mätning och beräkning av kamerahusets rörelser
2. Aktuatorer för kraftgenerering
3. Mekanik för översättning av aktuatorrörelse till rörelse av bildsensor och motvikt
4. Mätning av bildsensorns rörelse
5. Återkopplat regleringssystem

Detta projektet har behandlat punkterna 2, 3 och 4. Bildsensorn ska kunna förflyttas ± 2 mm i x led och y led med en maximal acceleration på $2m/s^2$.

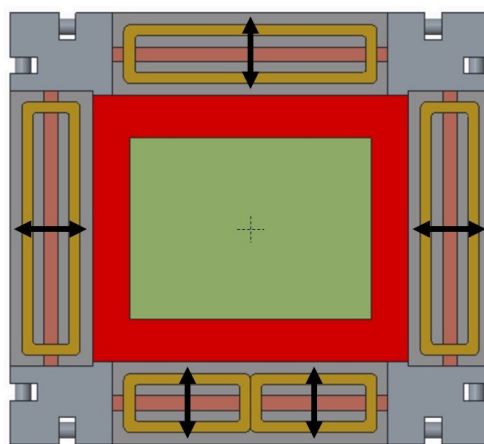
2 Linjära motorkoncept

Linjära dc aktuatorer, även kallade voice coil aktuatorer, valdes som aktiveringssystem. Kraftgenereringen från voice coil aktuatoren bygger på lorentzkraften enligt ekvation 1. Ekvationen visar att en laddning som rör sig genom ett magnetfält med en viss hastighet kommer påverkas av en kraft F . Genom att kombinera lorentz ekvation med definitionen för ström, kan kraften på en strömförande ledare i ett magnetfält beräknas enligt ekvation 2. Kraften på ledaren är vinkelrätt mot både magnetfältet och strömmen. Storleken på kraften $F[N]$ beror på storleken på strömmen $I[A]$, den magnetiska flödestätheten $B[T]$ och längden $l[m]$ på strömledaren i magnetfältet [1].

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

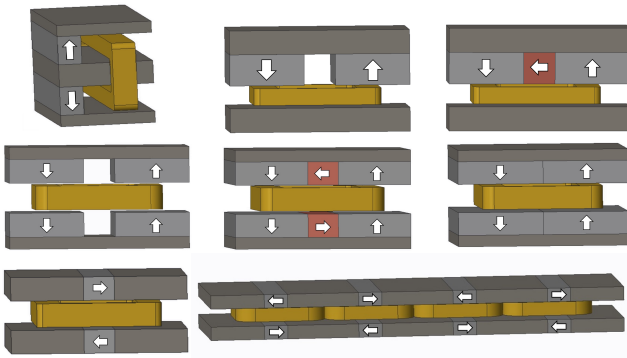
$$\vec{F} = \vec{B} \times \vec{I} \times l \quad (2)$$

Fyra voice coil aktuatorer placeras runt bildsensorn enligt figur 1. De jobbar parvis, två producerar kraft i x led och två i y led. Understa aktuatorspolen delas upp i två spolar. Detta görs för att kunna köra olika ström igenom dem och på så sätt skapa moment kring bildsensorns mitt för att kunna åstadkomma vridningar av bildsensorn.



Figur 1: Genomsnittsskärning för att visa aktuatorplacering i förhållande till den röda bildsensorn

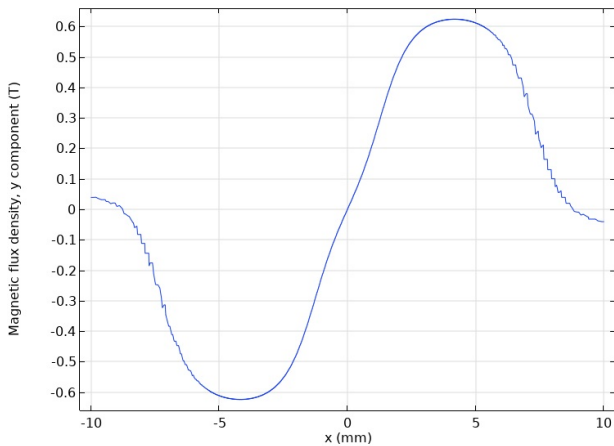
Olika linjära dc-aktuatorkoncept undersöktes, där magnetgeometrin, mjukjärnsgeometrin och spolgeometrin varierades. I figur 2 finns de koncept som övervägdes.



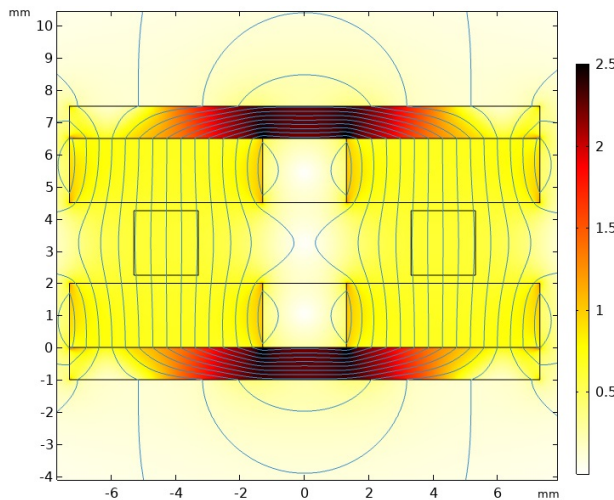
Figur 2: CAD modeller på aktuatorkoncept. Magneter ses i ljusgrått, mjukjärn i mörkgrått och spole i kopparfärg. Överst från vänster: 1, 2a, 2b, 3a, 3b, 3c, 4, 5

3 Metoder för utvärdering

Simuleringar för de olika koncepten gjordes i FEMM och COMSOL. I figur 4 visas resultat från en flödestätthet simulering i COMSOL på koncept 3a. I figur 3 visas en COMSOL graf över B-fältstyrkan i luftgapet spolen rör sig i.

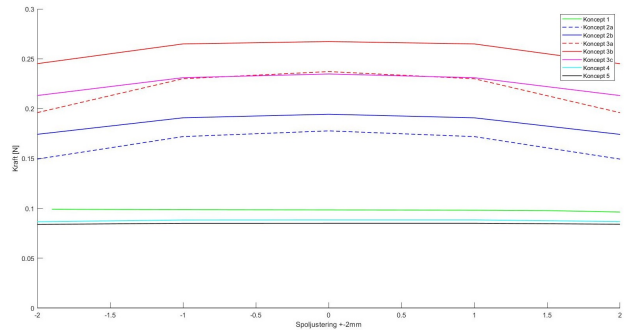


Figur 3: B-fältstyrkans variation över spolgapet i koncept 3a



Figur 4: Simulering av flödestätthet [T] för koncept 3a i COMSOL

De olika koncepten utvärderades utefter kraftgenerering och effektförluster. Figur 5 visar kraftresultatet över hela rörelseområdet för alla utvärderade koncept när spolen utsätts för 15.7mA, vilket motsvarar en strömdensitet på $2A/mm^2$ för den givna trådtjockleken. Kraft vid $2A/mm^2$ används som jämförelse då detta ses som en säker strömdensiteten ur ett värmeutvecklingsperspektiv för 0.1mm koppartråd [3]. Värmesimuleringar måste göras innan den definitiva strömdensiteten kan fastställas. I tabell 1 visas effektförlusten i spolen för att uppnå den eftersökta kraften på 0.17N för varje koncept samt max magnetfältstyrka 5mm bort från aktuatorerna. Utifrån resultaten presenterade i tabellen och grafen valdes det att gå vidare med koncept 3a, 3b och 3c då dessa hade lägst effektförluster i aktuatorspolen.



Figur 5: Resultande krafter för olika koncept vid 15.7mA genom spolen

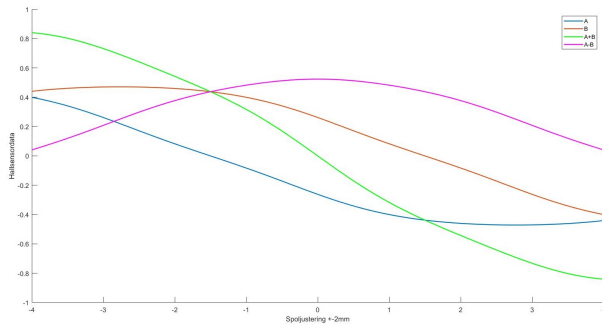
| Koncept | Effekt@0.17N | Max läckage @5mm |
|---------|--------------|------------------|
| 1 | 57.8mW | 0.029T |
| 2a | 14mW | 0.05T |
| 2b | 12.0mW | 0.035T |
| 3a | 8.8mW | 0.075T |
| 3b | 6.1mW | 0.073T |
| 3c | 9.0mW | 0.086T |
| 4 | 60.9mW | 0.035T |
| 5 | 82.2mW | 0.034T |

Tabell 1: Sammanställningstabell för de olika konceptens effekt och läckage

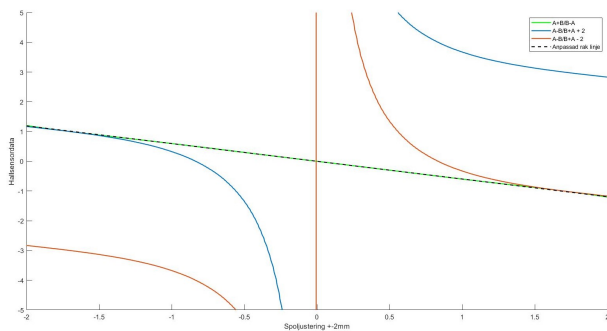
4 Positionsmätning

Som positionsmätningstrustning valdes hallsensorer. De är en sensortyp som varierar utspänning beroende på magnetfältstyrka. Detta kan användas för att mäta positionen på bildsensorn. En hallsensor kan placeras innanför den rörliga spolen och mäta det linjärt varierande B-fältet som syns mellan -2mm till 2mm i figur 3. Hallsensorerna och magnetfältstyrka är båda temperaturberoende. För att få bra positionsmätningar för temperaturer mellan $-20^{\circ}C$ till $50^{\circ}C$ måste temperaturberoendet kompenseras bort. Detta kan lösas genom att använda dubbla hallsensorer placerade på ett fast avstånd mellan varandra och mäta förhållandet mellan utsignalerna från dessa. Så länge som båda hallsensorer och båda magneter känner av samma temperatur så kan all temperaturberoende kompenseras

bort samtidigt som det linjära mätområdet kan förlängas [4].

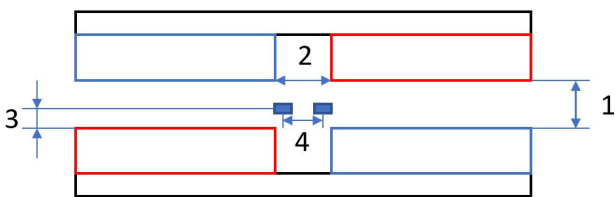


Figur 6: Utvecklade hallsensorpositionscurvor för koncept 3a



Figur 7: Hallsensorpositionscurvor för koncept 3a

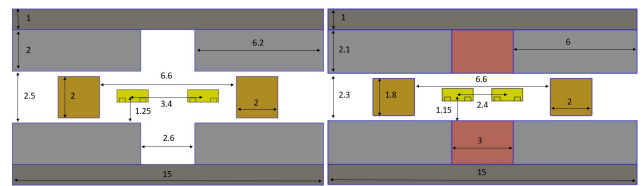
Genom att addera, subtrahera och dividera resultaten från både hallsensor A och hallsensor B, enligt $A+B/B-A$, kan en linjär kurva som förhåller hallsensordata till position passas in. Exempel på denna linjära kurva kan ses streckad i svart i figur 7. Hallsensorkurvorna A och B ändras med ändrad geometri på aktuatoren samt ändrad position på hallsensorerna inuti aktuatoren. Figur 8 visar de fyra parametrarna som påverkar utseendet på hallsensorkurvorna. Av dessa fyra så är det endast 1, höjden mellan magneterna, och 2, avståndet mellan magneterna, som påverkar aktuatorgeometrin. Med hjälp av COMSOL modifieras aktuatorgeometrierna på koncept 3a, 3b och 3c iterativt förhand för att producera de hallsensorkurvorna som bäst kan passa en rät linje. För koncept 3a och 3b gick det att hitta geometrier som gav lämpliga hallsensorkurvor, medans för koncept 3c gick det inte att hitta någon sådan geometri. Därför kasserades koncept 3c.



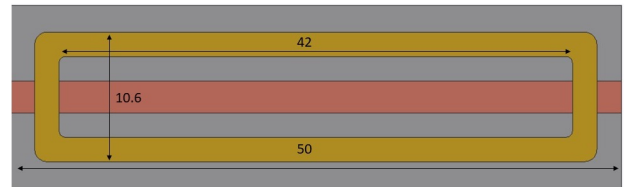
Figur 8: Geometriska parametrar som påverkar hallsensorkurvor

5 Konceptval

Det slutgiltiga konceptvalet står mellan de hallsensoroptimerade varianterna av koncept 3a och 3b. Kraftdata för dessa koncept är sammanställt i tabell 2 och tvärsnitt av aktuatorgeometrin kan ses i figur 9. För att göra en rekommendation på vilket koncept som borde tillverkas måste fler saker tas i beaktning, exempelvis pris på magneter och monterbarhet. Koncept 3b använder sig av hallbachmagnetstruktur vilket ökar kraften konceptet kan producera. Men mittmagneten i hallbachstrukturen kan vara svår att montera vilket kan göra att den kanske inte anses vara värd den cirka 10% ökningen i kraft den tillför. Med en mittmagnet har konceptet nu två olika magnetgeometrier som ska tillverkas, detta kan också öka kostnaden för aktuatorn. Ett slutgiltigt val mellan dessa två koncept överlämnas till framtiden.



Figur 9: Tvärsnitt med mått på slutgiltiga aktuatorkoncept. 3a till vänster och 3b till höger.



Figur 10: Slutgiltiga dimensioner ovanifrån för koncept 3a

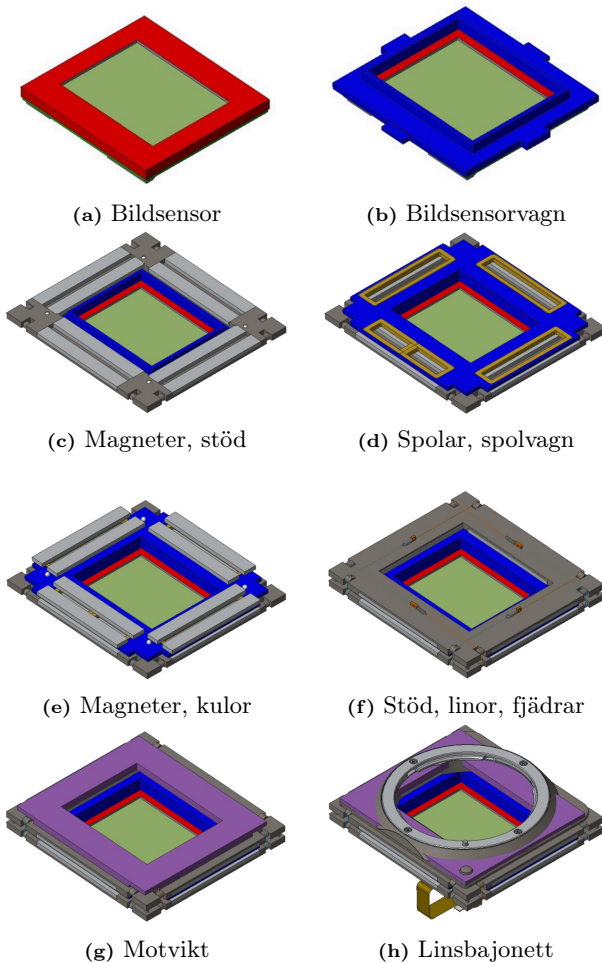


Figur 11: Slutgiltiga dimensioner ovanifrån för koncept 3b

| K | F@2A/mm ² | P@0.17N | Läckage@5mm |
|----|----------------------|---------|-------------|
| 3a | 0.217N | 8.8mW | 0.075T |
| 3b | 0.256N | 6.1mW | 0.058T |

Tabell 2: Data slutgiltiga koncept

6 Mekanik



Figur 12: Uppbyggnad av av bildsensorstabiliseringssystemet

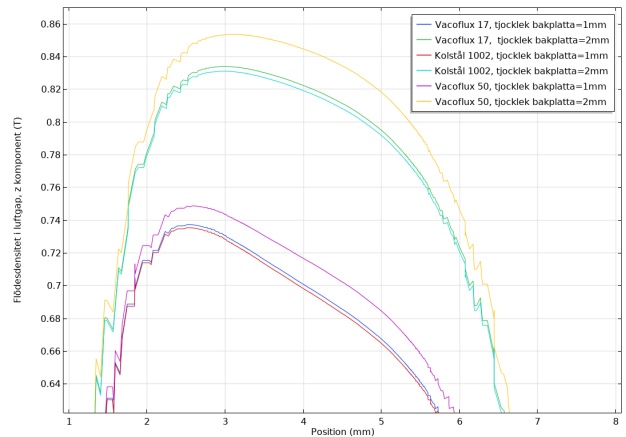
Figur 12 visar grundläggande ideer över hur det mekaniska systemet som kopplar ihop aktuatorerna till bildsensorn och motvikten. Bildsensorn och motvikten rullar mot kuler inplacerade i stödstrukturen som ses i mörkgrått i figur 12. Med hjälp av linor och fjädrar sammankopplas motvikten och bildsensorn så att de rör sig i motsatt riktning jämfört med varandra.

7 Materialval

Magneter valdes till neodym N52M magneter. De är kraftfulla magneter med hög magnetisk remanens B_r på 1445mT [2]. N52M har en högre temperaturklass vilket indikeras av suffixet M i dess namn, och klarar arbetstemperaturer på upp till 100°C. Ett annat val hade varit N50 som har magnetiskt remanens på 1425mT och klarar temperaturer upp till 80°C. Båda typerna har en reversibel temperturkoefficient på $-0.12\%/^{\circ}\text{C}$.

Som mjukjärnsbakplattor för att leda magnetfältet valdes vanligt kolstål. Eftersom magnetfältet är statiskt krävs det väldigt lite av materialet som ska användas som bakplatta. Hysteres förluster måste inte tänkas på då magnetfältet är statiskt. Eddy current förluster bortses från då spolen är placerad 1-2 mil-

limeter från bakplattan och då bakplattan redan är mättad från permanentmagnetfältet samt att strömmen genom spolen är liten. Reluktansen i det stora luftgapet spolen sitter i är helt dominerande i den magnetiska kretsen. Därför är små förbättringar av bakplattematerialets reluktans obefogade jämfört med kostnadsökningen. Simuleringar på koncept gjordes med kolstål, Vacoflux 17 och Vacoflux 50 som material till bakplattan. Den lägre mättnadsgraden på Vacoflux 17 och Vacoflux 50 gav lite högre magnetfältstyrka i spolgabet och lite lägre magnetfältsläckage. Dessa skillnaderna är små och måste vägas mot den mycket högre kostnaden av Vacoflux i förhållande till kolstål. I figur 13 illustreras förändringen i flödesdensiteten i luftgapet för de olika materialen.



Figur 13: Flödesdensitet i luftgap för olika tjocklek och material på bakplatta

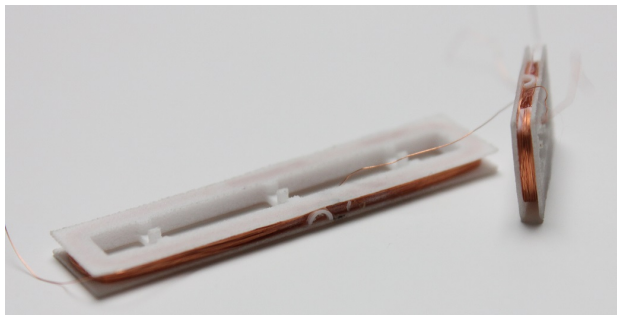


Figur 14: 3D-printade testtrigg. Magneter och bakplatta är fästa i statonära delar medans spolen sitter fäst i en spolvagn som rör sig mot infästa kuler.

8 Prototyp

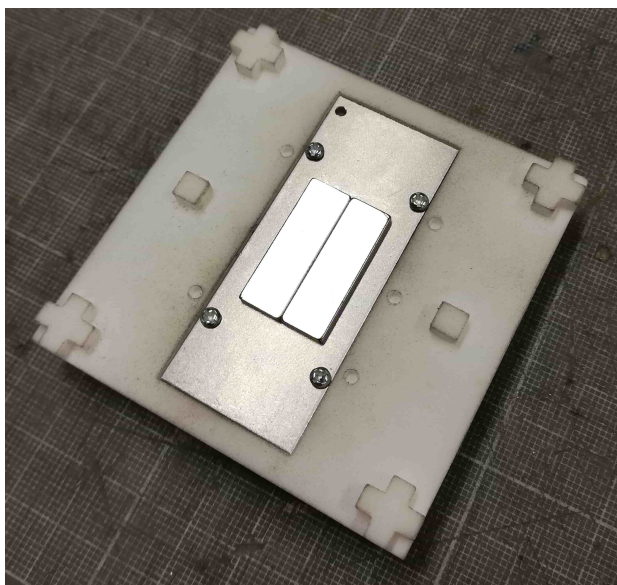
En 3D-printad testtrigg tillverkades för att verifiera kraftsimuleringarna gjorda i FEMM och COMSOL. Spolar handlindades 135 varv på 3D-printade bobbins med en fill factor på cirka 50%, se figur 15. Magneter

och bakplattor monterades i den 3D-printade prototypen, se figur 14 och 16. Kraft från spolvagnen mättes med kraftmätare för olika strömmar mellan 10-180mA. Resultatet av dessa kraftmätningar kan ses i figure 17 och 18 där den blå linjen visar FEMM simulering av ett system så likt prototypen som möjligt. För koncept 3a så låg uppmätta krafter i linje med simuleringar medans för koncept 3c så uppnådde prototypen cirka 83% av det simulerade kraftmätningarna.



Figur 15: Handlindade spolar på 3D printad bobbin

Dåliga toleranser och nylon materialet på 3D-printade prototypen ger upphov till förluster som simuleringarna inte har tagit hänsyn till. Desutom går luftgapet på prototypen inte att uppskatta med någon större noggranhet då spolvagnen som håller spolarna på rätt avstånd från magneterna sviktar lite. Slutligen påverkar nollställningskalibreringen av kraftmätningdonet Vernier Dual Force Sensor mätningen. För att få bättre testdata måste en prototyp med bättre toleranser tillverkas samt en noggrannare kraftmätare användas.

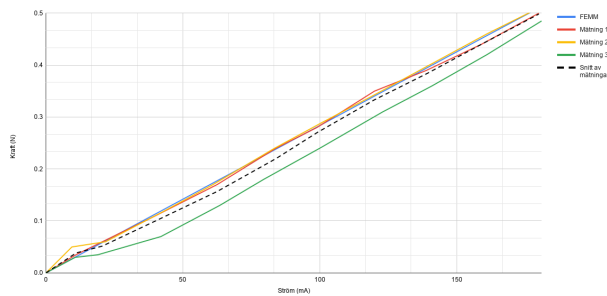


Figur 16: Magnet och bakplatta placerad i ena halvan av 3D-printade testriggen

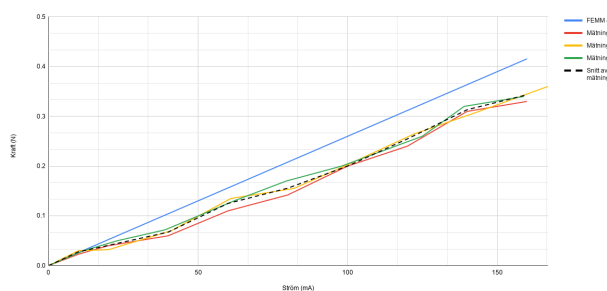
9 Testning

Krafttester och tester av hallsensorpositions-mätning gjordes med den 3D-printade prototypen. Mätningen för koncept 3a som kan ses i figur 17 ligger i linje med simulerad kraft medans mätningen för koncept 3c, som ses i figur 18 ligger på cirka 83% av simulerad kraft. I

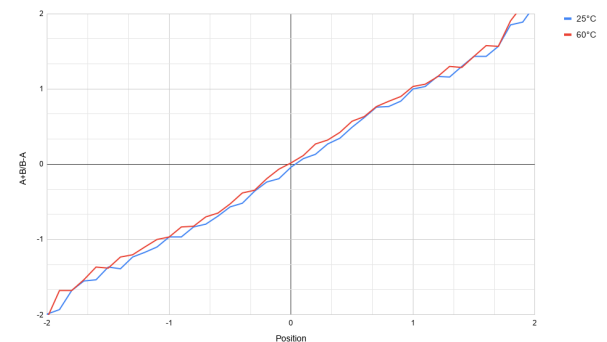
figur 19 visas resultatet från positionsmätningstest med två hallsensorer. Grafen visar att hallsensorerna kan användas för att mäta positionen, men noggrannare mätningar måste göras innan temperaturkompensationen från hallsensorberäkningen kan konstateras fullt fungera.



Figur 17: Kraftmätning av prototyp 3a jämfört med simulerat koncept i FEMM



Figur 18: Kraftmätning av prototy 3c jämfört med simulerat koncept i FEMM



Figur 19: Resultat från hallsensortester gjorda under 25°C och 60°C. X-axeln visar placerad poition medans Y-axeln visar beräknad position från hallsensor A och B.

10 Diskussion

Fler verifierande testningar med bättre prototyper och noggrannare mätutrustning måste göras innan några definitiva slutsatser kan dras. De prototyperna som kunde bygga innehöll inte de exakta önskade magnetgeometrierna, detta på grund av att specialbeställda magneter tar för långtid att få fram. Magneter beställdes direkt från leverantörers lagerhyllor vilket begränsade de tillgängliga geometrierna. Detta resulterade i att endast varianter på koncept 3a och 3c testades. Ett koncept med halbachstruktur hade velats testas, men det gick inte att få tag på magnetgeometri till det.

11 Referenser

- [1] A. Veltman, D.W.J Pulle and R.W.De Doncker. *Fundamentals of Electric Drives* Springer, 2007, pp. 8-25. ISBN:978-1-4020-5504-1
- [2] Arnold Magnetic Technologies, *NEODYMIUM IRON BORON MAGNETS* Hämtad 2020-05-18, <https://www.arnoldmagnetics.com/products/neodymium-iron-boron-magnets/>
- [3] Power Stream, *Wire gauge and current limits including skin depth and length*, Hämtad 2020-06-14, https://www.powerstream.com/Wire_size.htm
- [4] T.Hoshino, 2006, *Position detector and positioning device*, EP20060715648 20060314, Hämtad från <https://worldwide.espacenet.com/>